

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**

**на диссертацию Лаврухина Александра Сергеевича**  
**на тему «Магнитосферы небесных тел в разных условиях**  
**обтекания потоком замагниченной плазмы»,**  
**представленную на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Диссертационная работа Александра Сергеевича Лаврухина посвящена исследованию магнитосфер планет с разными параметрами и в различных условиях их обтекания солнечным ветром.

**Актуальность темы** обусловлена ключевой ролью магнитного поля внешних токовых систем, образуемых при обтекании планет звездным ветром, в обмене импульсом и энергией между различными компонентами плазмы и электромагнитным полем и, в частности, в формировании радиационных поясов и областей сильных магнитных возмущений и электрических полей. Многообразие факторов, влияющих на динамику магнитосфер, объясняет сохранение большого числа нерешенных задач в рамках этой темы.

**Новизна полученных в диссертации результатов** связана с решением ряда задач для магнитосфер разной структуры, а именно, магнитосфер Меркурия, Земли и спутника Юпитера Ганимеда. Конкретные новые результаты кратко охарактеризованы ниже при изложении содержания диссертации.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Введение содержит обобщенную характеристику проблематики работы, обоснование актуальности поставленных задач, краткое изложение полученных новых результатов, положения, выносимые на защиту, характеристику достоверности результатов, перечень

публикаций автора по теме диссертации, описание личного вклада автора в полученные результаты.

**В первой главе** описано исследование параметров магнитосферы Меркурия. Для этой цели разработан алгоритм автоматического определения положения головной ударной волны и магнитопаузы, апробированный на известных результатах ручного определения этих границ. Проанализированы зависимости положения указанных границ от гелиоцентрического расстояния в предположении об их параболоидной форме. Полученный для магнитопаузы результат согласуется с опубликованными ранее, для головной же ударной волны впервые определен факт практического отсутствия такой зависимости.

**Вторая глава** посвящена анализу возможности финитного движения (захвата) заряженных частиц в магнитосфере Меркурия с помощью формализма Штермера. Определены области параметров, при которых в приближении дипольного магнитного поля планеты и однородного внешнего магнитного поля (моделирующего поле токов магнитопаузы) существуют захваченные частицы с энергиями порядка 100 кэВ.

**В третьей главе** анализируются области захвата частиц кольцевого тока в модельной магнитосфере Земли, включающей, помимо дипольного геомагнитного поля и однородного поля, вклад нитевидного азимутально симметричного кольцевого тока. Показано, что увеличение силы кольцевого тока ведет к такому изменению магнитной конфигурации, в которой энергичные заряженные частицы оказываются не захваченными в магнитосфере, а покидают ее.

**В четвертой главе** изложены результаты моделирования магнитных возмущений во время геомагнитной бури 2023 г., отличавшейся большой суббуревой активностью и сильным сдвигом аврорального овала к экватору. В рамках параболоидной модели магнитосферы выполнены расчеты вклада отдельных токовых систем в геомагнитный индекс

SYM-H (усредненное по азимуту магнитное возмущение на экваторе). Показано, что индекс SYM-H, полученный в результате моделирования, отражает основные особенности наблюдаемого поведения этого индекса и на большей части интервала бури дает значения, количественно согласующиеся с наблюдениями. Вклады кольцевого тока и тока хвоста в максимуме абсолютной величины индекса SYM-H равны с точностью 10–20%. Новизна результата заключается в анализе нового события, имеющего специфические черты.

**В пятой главе** рассматривается возможная роль ускорения электронов продольным электрическим полем в формировании сияний на спутнике Юпитера Ганимеде. Сделан вывод, что ток в ионосфере, который рассчитывается исходя из ЭДС МГД генератора, создаваемого при обтекании планеты потоком плазмы, и педерсеновской проводимости ионосферы, не обеспечивается существующей на авроральных силовых линиях тепловой плазмой, вследствие чего возникает продольное электрическое поле, ускоряющее надтепловые электроны и дающее таким образом вклад в интенсивность полярных сияний.

**Апробация результатов.** Результаты работы опубликованы в шести статьях в авторитетных российских и международных журналах, представлены на ведущих российских и международных научных конференциях.

**Достоверность полученных в диссертации результатов,** помимо апробации путем их опубликования в научной печати и представления на конференциях, определяется грамотным использованием известных теоретических подходов и разработанных ранее моделей и сопоставлением новых результатов с опубликованными в научной литературе.

**Замечания.** Работа не свободна от недостатков, часть которых можно рассматривать как пожелания к дальнейшей работе, а часть относит-

ся к качеству изложения материала. Начну с замечаний по существу.

При количественном сопоставлении тех или иных эмпирически определенных величин нужны оценки погрешностей. Это, как правило, в работе не сделано. В результате выводы в ряде случаев менее убедительны, чем они могли бы быть.

Так, полученный в главе 1 показатель степени 0,09 для зависимости радиального расстояния головной ударной волны от давления солнечного ветра приведен без какого-либо обсуждения, хотя огромный разброс точек, для которых проведена эта подгонка, с очевидностью указывают на необходимость оценки статистической значимости этой величины. Вывод к главе при этом сформулирован более разумно (“было обнаружено, что это расстояние почти не зависит от давления”), но из предыдущего текста это не вытекает. Однако в выводах к диссертации (с.128, п.1) отсутствие этой зависимости завуалировано, чего не следовало делать.

Особенно важно обращать внимание на погрешности при формулировке выводов о преобладании той или иной величины над другими. Так сделанный в главе 4 вывод о преобладании вклада токовой системы хвоста в индекс SYM-H недостаточно обоснован, поскольку не сказано, насколько велико это преобладание и насколько велики погрешности этой оценки.

Если же судить по графикам рис.4.6, то величина вклада токов хвоста почти везде и на всех фазах бури включая главную меньше, чем вклад кольцевого тока. В середине главной фазы есть лишь короткий промежуток времени (соответствующий большой суббуре), когда это соотношение инвертировано, но и здесь вклады указанных токовых систем равны с точностью  $\pm 10\%$ . В связи с этим фраза на с.114 (“Вклад кольцевого тока слегка больше вклада токового слоя хвоста, однако, согласно моделированию, именно последний дает наименьшее значение SYM-H.”)

вряд ли корректна, поскольку в момент минимума наблюдаемого SYM- $H$  вклады кольцевого и тока хвоста практически одинаковы (см. выше), а вклад токов на магнитопаузе почти нулевой.

В итоге вывод, вынесенный в научное положение, формально верен, но его следует признать слишком категоричным и трудно считать особо ценным. Более того, непонятно, почему именно этот вывод единственный из всего материала данной главы удостоился такой высокой оценки автора. Притом следует отметить, что это научное положение не нашло отражения в выводах ко всей диссертации.

Вопрос о погрешностях проводимых оценок можно поставить и в отношении расчетов в главе 5, что особенно ясно при чтении результата 5 на с.129: разница между оценкой тока в 471 кА и тока, обеспеченного тепловыми электронами (425 кА) не слишком велика по астрофизическим масштабам, насколько точны эти величины?

При изложении истории вопроса автор иногда излишне сужает тему, так что важные аналогии остаются за рамками текста. Особенно это проявилось в главе 5, где следовало бы упомянуть и другие известные случаи формирования продольного ускоряющего поля в обедненной заряженными частицами области за счет недостаточного экранирования плазмой. Если даже забыть об авроральной области земной магнитосферы, то есть подобные примеры и на других планетах. В частности, ускорение электронов в ионосфере Титана рассматривалось в работе Zaitsev, V. V., V. E. Shaposhnikov, M. L. Khodachenko, H. O. Rucker, and M. Panchenko (2010), Acceleration of electrons in Titan's ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 115, A03212, doi:10.1029/2008JA013958.

Диссертация имеет ясную, хотя и не везде оптимальную, структуру и в целом грамотно написана. Некоторые замечания по стилю изложения и грамматике приведены ниже.

Вводные разделы к главам составлены неоднородно: далеко не все они содержат такие важные элементы как история исследований применительно к решаемой в главе задаче и собственно постановку задачи с акцентом на новые по сравнению с предшественниками подходы и/или результаты.

Например, раздел 3.2, посвященный истории исследования разрешенных областей движения частиц в магнитосфере Земли, следовало бы закончить краткой характеристикой новизны постановки задачи или результатов или того и другого в данной работе. Следующий далее раздел 3.3 содержит некоторые базовые формулы, относительно новизны которых ничего не говорится. Читателю предоставляется самому догадаться, содержит ли этот раздел повторение известного формализма или здесь есть что-то новое. И даже в разделе 3.4 не сказано, отличаются ли, и насколько, вводимые при моделировании предположения от использованных в предыдущих работах.

Изложение модели в главе 4 непоследовательно. В результате неясно, как именно обсуждаемые в разделе 4.4 параметры учитываются в формуле (4.1).

Более мелкие замечания приведены ниже.

Глава 1 — не пояснен термин “флэринг” и не пояснен параметр, описывающий это явление.

На с.42 появляется величина  $\Delta R_{SS}$ . Что это такое — не сказано, но эта величина включена в таблицу основных параметров магнитосферы.

На с.43 упоминается теоретическое предсказание величины отношения расстояний до подсолнечной точки в перигелии и афелии, но ничего не сказано о сути этих теоретических расчетов.

В выводах к главе 1 указана точность определения координат границ магнитосферы в км, но было бы лучше оценить ее в единицах лармо-

ровского радиуса частиц (на основании текста главы).

На с.74 есть фраза: “Чем сильнее буря, тем ближе к Земле подходит кольцевой ток и тем медленнее он диссипирует.” Но, насколько мне известно, при сильных возмущениях время распада кольцевого тока, напротив, уменьшается, о чем говорит и автор ниже на этой странице.

В главе 5 не хватает рисунка, схематически иллюстрирующего предложенную схему формирования ускоряющей разности потенциалов.

Встречаются стилистические неточности, например:

**с.14:** “Ввиду своих небольших размеров . . . время . . . для Меркурия составляет около 3 минут”

**с.21:** “Задавая на вход размер окна. . . получаются точки. . .”

**с.51:** “На «побочный» продукт. . . не уделялось достаточно внимания.”

**с.57:** “. . . направленного на север главного члена разложения. . .”

**с.87:** “Анализ Штермера не является самосогласованным приближением”

**с.122:** “Полусумма. . . также является уравнением Лапласа.”

Не повезло запятым — их автор как бы перебрасывает из одной фразы в другую, не слишком считаясь с правилами грамматики.

В тексте есть опечатки (например, с.8, п.6; с.13, строка 1 раздела 1.1; с.15 строка 2 снизу; с.26 строки 1–2 снизу; и т.д.).

**Выводы.** Вместе с тем, указанные замечания не умаляют новизны и важности полученных результатов и, в целом, значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к

работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лаврухин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

*Официальный оппонент:*

доктор физико-математических наук, доцент,  
главный научный сотрудник Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический  
институт» (ПГИ),  
заведующий сектором Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук  
им. А.В. Гапонова-Грехова» (ИПФ РАН)  
Демехов Андрей Геннадьевич

30.08.2024

*Контактные данные:*

телефон: (81555) 79–475, e-mail: demekhov@pgia.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация:

01.04.08 — физика плазмы

*Адрес места работы:*

184209, г.Апатиты, Академгородок, 26а  
телефон: (81555) 76–530, e-mail: admin@pgia.ru

Подпись сотрудника ПГИ А. Г. Демехова заверяю:

Врио директора ПГИ  
к.ф.-м.н.

К. Г. Орлов